昆 虫 学 报 *Acta Entomologica Sinica*，October 2007，50(10)：1042 - 1048　　ISSN 0454-6296

取食重金属铜对棕尾别麻蝇亲代及子代生长发育与繁殖的影响

吴国星[1,2]，**高　熹**[1,2]，**叶恭银**[1,*]，**胡　萃**[1]，**程家安**[1]

（1. 浙江大学昆虫科学研究所，杭州　310029；2. 云南农业大学植物保护学院，昆明　650201）

摘要：为了评估取食含重金属铜饲料对棕尾别麻蝇 *Boettcherisca peregrine* 亲代及子代的生长发育与繁殖的影响，在室内给棕尾别麻蝇初产幼虫饲喂含不同浓度(200，400，800 和 1 600 μg/g) Cu^{2+} 的饲料直至化蛹，并对亲代和子代的生长发育和繁殖有关指标进行了观察和分析。结果表明：低浓度的 Cu^{2+} (200 μg/g)对其体重和体长起促进作用，但对幼虫历期、化蛹率、蛹历期、羽化率、性比、交配率和产仔量无显著作用；较高浓度的 Cu^{2+} 则有抑制作用，且 Cu^{2+} 处理浓度越高，亲代幼虫、蛹和雌雄成虫的体重越轻，幼虫和蛹的体长越短，化蛹率、羽化率、交配率和产仔量越低，幼虫历期和蛹期越长，成虫寿命越短。但 Cu^{2+} 处理对成虫性比则无显著的影响。相比之下，经 Cu^{2+} 处理后雌虫所产的子代若不再经 Cu^{2+} 处理，其子代生存、生长发育与繁殖则基本不受影响，说明 Cu^{2+} 对亲代的影响不能遗传至子代。此外，还探讨了该蝇亲代与子代体内 Cu^{2+} 含量在其变态过程中的变化。

关键词：棕尾别麻蝇；铜；生长发育；繁殖；重金属污染

中图分类号：Q966　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296(2007)10-1042-07

Effects of dietary copper on the growth，development and reproduction of *Boettcherisca peregrine*（Diptera：Sarcophagidae）in the parental generation and first filial generation

WU Guo-Xing[1,2]，GAO Xi[1,2]，YE Gong-Yin[1,*]，HU Cui[1]，CHENG Jia-An[1]（1. Institute of Insect Sciences，Zhejiang University，Hangzhou 310029，China；2. College of Plant Protection，Yunnan Agricultural University，Kunming 650201，China）

Abstract：For evaluating the effects of dietary heavy metals on the growth，development and reproduction of the parental generation and first filial generation of flesh fly *Boettcherisca peregrine*（Diptera：Sarcophagidae），newly oviposited larvae of the fly were exposed to various administered concentrations（200，400，800，and 1 600 μg/g）in the artificial diet until pupation under laboratory conditions，and some parameters relative to the growth，development and reproduction of the fly were observed and analysed. The results indicated that the low dietary Cu^{2+}（200 μg/g）significantly enhanced body weight and body length of *B. peregrine* but had no obvious effect on its larval duration，pupation ration，pupal duration，eclosion ratio，sex ratio，mating ratio and oviposition number，while higher doses inhibited development and reproduction. Moreover，with increasing of dietary Cu^{2+} concentration，the body weight of larva，pupa and adult become lighter，the body length of larva and pupa turned shorter，the percentages of pupation，emergence，mating and the fecundity were reduced，the duration of larva and pupa stage was prolonged，and the life span of adult shortened. However，the effect of copper on the sex ratio was not obvious. In contrast，the growth，development and reproduction of *B. peregrine* in the first filial generation unexposed to Cu^{2+} were almost not markedly affected in spite of the fact that their parental generation had previously been exposed to Cu^{2+}. This suggests that effects of dietary copper on the parental generation of *B. peregrine* will not be transferred to its next generation. In addition，

基金项目：国家自然科学基金重点项目(30230070)

作者简介：吴国星，男，1975 年生，山东临沂人，讲师，从事昆虫生理生化及分子生物学研究，E-mail：wugx1@163.com

* **通讯作者** Author for correspondence，E-mail：chu@zju.edu.cn

收稿日期 Received：2006-11-13；**接受日期** Accepted：2007-08-27

changes in Cu^{2+} contents of *B*. *peregrine* during metamorphosis in both the parental generation and the first filial generation were also determined.

Key words: *Boettcherisca peregrine*; copper; development; reproduction; heavy metal pollution

随着采矿、冶炼、电镀等工业的发展，镉(Cd)、铜(Cu)等重金属伴随着三废排放到环境中，造成环境的污染，严重威胁着人类的健康和其他动植物的生存。对生物体来说，铜是必要的微量营养元素，但是在一定条件下过度吸入则是有毒的(Bremner, 1998)。铜中毒由许多因素而定，如物种、遗传、年龄和食物等。在陆地生态系统中昆虫种类多、数量大、分布广，往往会取食、转移和代谢环境中的铜。因此，研究和评估铜对陆地昆虫的影响是必要的。目前此方面的研究还不多，并且主要针对铜在昆虫中的积累和吸收方面，涉及种类包括甜菜蚜 *Aphis fabae* (Crawford *et al*., 1990, 1995)，非洲飞蝗 *Locusta migratoria* (Crawford *et al*., 1996)，舞毒蛾 *Lymantria dispar* (Gintenreiter *et al*., 1993a, 1993b)，以及普通锯角叶蜂 *Diprion pini*、栎绿卷蛾 *Tortrix viridana* 和荨蛱蝶 *Aglais urticae* (Lindqvist, 1992)等。然而，铜对昆虫影响的生物学效应，特别是对其亲代及子代生长发育和繁殖的影响还缺少研究。

棕尾别麻蝇 *Boettcherisca peregrina* (双翅目：麻蝇科)是一种腐食性、卵胎生昆虫。在自然条件下，它主要以腐败的动植物、垃圾和粪便等为食物。研究重金属对其影响的生物学效应，有望找到适宜的指标将该蝇用作指示生物以监测环境中重金属污染状况(Dallinger, 1994)。先前我们已经报道了 Cd^{2+} 对其亲代及子代生长发育和繁殖的影响(吴国星等, 2006)。现就 Cu^{2+} 对棕尾别麻蝇亲代及子代生长发育和繁殖影响的研究结果整理如下，以期为开展重金属污染的生物监测提供更多的理论依据与技术参数。

1　材料与方法

1.1　供试虫源

棕尾别麻蝇取自浙江大学昆虫科学研究所室内饲养多年的品系。幼虫用人工饲料(麦麸:水:猪肝=3:5:6)在25℃±1℃和12L:12D的光周期条件下饲养，成虫饲喂水和砂糖。

1.2　Cu^{2+} 对棕尾别麻蝇亲代生长发育与繁殖的影响

收集棕尾别麻蝇成虫8 h内产的幼虫作为亲代(P)用于实验。将亲代幼虫移入500 mL的玻璃果酱瓶中，每瓶300头，分别饲喂等量的 Cu^{2+} 含量分别为200、400、800和1 600 μg/g的人工饲料，每浓度设3个重复。同时设饲喂等量不含 Cu^{2+} 的人工饲料为对照。每隔24 h从每瓶中取出10头幼虫，用蒸馏水洗净后排空24 h，以吸水纸拭干，先用电子天平(AB204-E, Mettler Toledo)称重，然后，以XA液(二甲苯:乙醇=1:1)处理，待虫体伸长后再用游标卡尺测量体长(王江峰等, 2002)。定时考查幼虫历期，直至开始化蛹为止。化蛹后，继续考查各浓度处理和对照的化蛹率、蛹体长、蛹重和历期。同时，取样各处理和对照的幼虫和蛹，供作其体内 Cu^{2+} 含量的测定。待成蝇羽化后，将各处理与对照刚羽化的雌雄成蝇分开饲养，分别考查雌雄蝇体重，寿命，及雌雄比，并选取羽化后第1、5、10、15和20天的成虫，供作体内 Cu^{2+} 含量的测定。同时，将各处理和对照的羽化后6~7天的未交配雌雄成虫置于玻璃果酱瓶内，每瓶雌雄成虫各4头，测定3 h内的交配率。实验重复3次。交配后，将雌蝇单独转移至放有新鲜猪肝的养虫笼内任其产仔，测定单头雌蝇的产仔量。

1.3　Cu^{2+} 对棕尾别麻蝇子代生长发育与繁殖的影响

收集按方法1.2处理得到的雌蝇所产幼虫，及其相应对照作为 F_1 代，分别转移到不含 Cu^{2+} 的人工饲料上饲养。之后，按方法1.2节考查、统计幼虫、蛹和成虫的各项指标，并收集幼虫、蛹和成虫期各阶段的样品供体内 Cu^{2+} 含量的测定。

1.4　棕尾别麻蝇体内 Cu^{2+} 含量的测定

参照Niu等(2002)将方法1.2和1.3准备的各样品(幼虫或蛹均为10头，成虫含雌雄虫各5头)，分别用2.0 mL混合酸($HClO_4$: HNO_3 = 1 : 5, v/v)消化，然后定容到25 mL，再用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer, AAnalyst 100)测定 Cu^{2+} 的含量。每样品均设有3个重复。

1.5　数据统计与分析

利用DPS软件(唐启义和冯明光, 2002)对各处理指标进行统计与方差分析，再以Duncan's新复极差法比较各处理之间的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 Cu^{2+} 对棕尾别麻蝇亲代和子代生长发育与繁殖的影响

2.1.1 幼虫期：亲代幼虫经不同浓度 Cu^{2+} 处理后，幼虫体重（图 1：A）（$F = 7.577$，$df = 4$，$P = 0.0013$）和体长（图 1：B）（$F = 13.815$，$df = 4$，$P < 10^{-4}$）均受到极显著影响。处理浓度越高，体重越轻，体长越短，但低浓度的 Cu^{2+}（200 μg/g）不仅对体重和体长无抑制作用，反而有促进作用。就幼虫发育历期而言，其影响程度因 Cu^{2+} 处理浓度而异（$F = 3.398$，$df = 4$，$P < 10^{-4}$），其中低浓度（200 μg/g 和 400 μg/g）处理无显著影响，高浓度（800 μg/g 和 1 600 μg/g）处理，则显著延长（表 1）。

各处理子代幼虫若不再经 Cu^{2+} 处理时，其体重（$F = 2.336$，$df = 4$，$P = 0.0996$）（图 1：C），体长（$F = 1.576$，$df = 4$，$P = 0.2287$）（图 1：D）及发育历期（$F = 1.201$，$df = 4$，$P = 0.3811$）与对照相比则均未受到显著影响（表 1）。

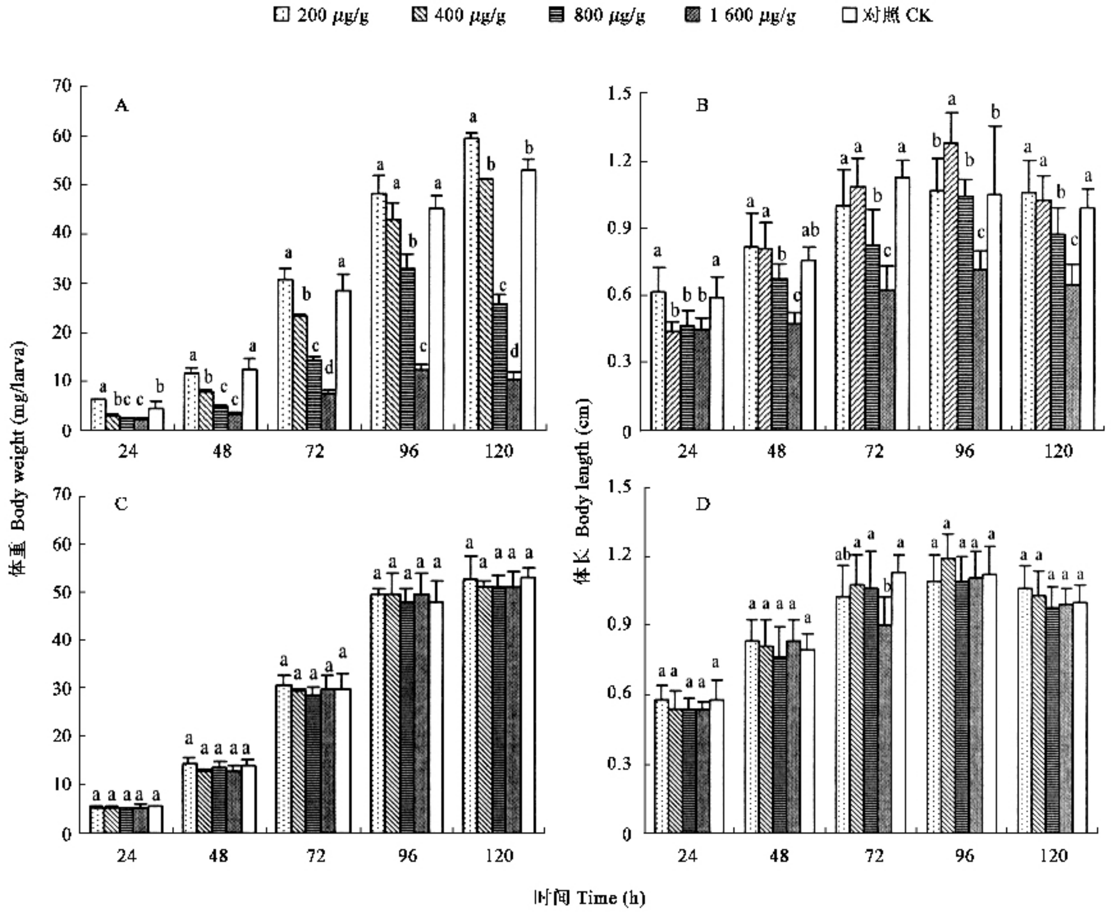

图 1 不同浓度 Cu^{2+} 处理对棕尾别麻蝇亲代（A，B）和子代（C，D）幼虫体重和体长的影响

Fig. 1 Effects of dietary copper at different concentrations on body weight and length of *Boettcherisca peregrine* larvae in the parental generation (A, B) and the first filial generation (C, D)

数据为平均值 ± 标准差，柱子上标有不同字母表示同一时间不同处理间差异显著（$P < 0.05$，Duncan 新复极差法检验）。The values are mean ± *SD*. For the same time of exposure to copper, no significant difference was found among the data with the same lowercase letter at $P = 0.05$ (Duncan's multiple range test).

2.1.2 蛹期：亲代幼虫经不同浓度 Cu^{2+} 处理后，蛹期各项考查指标均受到明显的影响，其中化蛹率（$F = 111.128$，$df = 4$，$P < 10^{-4}$）、蛹重（$F = 182.183$，$df = 4$，$P < 10^{-4}$）、蛹体长（$F = 29.476$，$df = 4$，$P < 10^{-4}$）和蛹期（$F = 11.489$，$df = 4$，$P = 0.0009$）均受到 Cu^{2+} 处理浓度的极显著影响。但低浓度处理和高浓度处理后的效果不一样。低浓度（200 μg/g 和 400 μg/g）使蛹重变重，蛹体长变长（表 2）；而高浓度 Cu^{2+}（800 μg/g 和 1 600 μg/g）处理的幼虫，化蛹率比对照明显下降，蛹重变轻，蛹体长变短，蛹期变长（表 2）。

表1　不同浓度 Cu^{2+} 处理对棕尾别麻蝇亲代和子代幼虫历期的影响

Table 1　Effects of dietary copper at different concentrations on the developmental duration of *Boettcherisca peregrine* larvae in the parental generation (P) and the first filial generation (F_1)

Cu^{2+}浓度 Cu^{2+} concentrations (μg/g)	发育历期 Developmental duration (h)					
	1龄 1st instar		2龄 2nd instar		3龄 3rd instar	
	P	F_1	P	F_1	P	F_1
200	14.28 ± 2.02 b	14.28 ± 2.02 a	26.67 ± 2.52 c	26.67 ± 2.52 a	76.00 ± 1.00 c	75.67 ± 3.51 a
400	14.33 ± 1.53 b	14.33 ± 1.53 a	28.33 ± 2.52 bc	28.33 ± 2.53 a	78.33 ± 2.08 c	75.00 ± 4.58 a
800	17.67 ± 0.58 ab	14.00 ± 1.00 a	32.02 ± 2.65 b	28.13 ± 1.80 a	95.04 ± 3.02 b	79.17 ± 2.51 a
1 600	20.33 ± 2.52 a	13.20 ± 2.16 a	40.00 ± 2.00 a	28.00 ± 1.40 a	115.33 ± 11.85 a	74.62 ± 3.38 a
对照 CK	14.57 ± 1.69 b	13.90 ± 1.15 a	28.67 ± 1.53 bc	28.67 ± 1.53 a	74.33 ± 4.04 c	74.33 ± 4.04 a

数据为平均值 ± 标准差，同一列中标有不同字母表示差异显著($P < 0.05$，Duncan 新复极差法检验)。P 和 F_1 分别表示亲代和子 1 代。表 2 同。The values are mean ± *SD*. In the same column, there are not significant different among the data with the same lowercase letter at $P = 0.05$ (Duncan 's multiple range test). P and F_1 means the parental generation and the first filial generation, respectively. The same for Table 2.

当各处理子代幼虫不再经 Cu^{2+} 处理时，其化蛹率($F = 0.557$，$df = 4$，$P = 0.6972$)、蛹重($F = 0.604$，$df = 4$，$P = 0.6684$)、蛹体长($F = 0.869$，$df = 4$，$P = 0.4921$)和蛹期($F = 1.410$，$df = 4$，$P = 0.2994$)与对照相比则同样均未受到显著影响(表 2)。

表2　不同浓度 Cu^{2+} 处理对棕尾别麻蝇亲代和子代蛹及有关生物学特性的影响

Table 2　Effects of dietary copper at different concentrations on biological characteristics of *Boettcherisca peregrine* pupae in the parental generation (P) and the filial generation (F_1)

Cu^{2+}浓度 Cu^{2+} concentrations (μg/g)	化蛹率 Pupation ration (%)		蛹重 Pupal weight (mg fw/pupa)		蛹长 Pupal length (cm)		蛹历期 Pupal duration (d)	
	P	F_1	P	F_1	P	F_1	P	F_1
200	97.75 ± 2.02 a	96.38 ± 1.49 a	45.25 ± 2.35 a	40.19 ± 0.44 a	0.87 ± 0.05 a	0.84 ± 0.04 a	10.03 ± 0.31 b	10.03 ± 0.31 a
400	89.00 ± 1.00 a	95.63 ± 3.82 a	39.52 ± 2.56 b	40.27 ± 0.93 a	0.83 ± 0.04 a	0.83 ± 0.04 a	10.67 ± 1.15 b	10.67 ± 1.15 a
800	70.67 ± 5.86 b	97.50 ± 1.91 a	25.51 ± 1.61 c	39.79 ± 1.07 a	0.70 ± 0.04 b	0.82 ± 0.03 a	14.67 ± 1.53 a	11.83 ± 1.61 a
1 600	20.00 ± 10.0 c	94.75 ± 2.63 a	15.39 ± 0.18 d	39.43 ± 0.91 a	0.67 ± 0.04 b	0.84 ± 0.02 a	16.00 ± 2.65 a	12.17 ± 1.76 a
对照 CK	97.67 ± 2.08 a	95.00 ± 4.16 a	38.13 ± 0.90 b	40.33 ± 0.78 a	0.71 ± 0.08 b	0.85 ± 0.03 a	9.67 ± 0.58 b	10.33 ± 1.53 a

fw：鲜重 Fresh weight；下同 The same below.

2.1.3　成虫期：幼虫经不同浓度 Cu^{2+} 处理后，对亲代成虫羽化率、雌雄虫体重、交配率、产仔量和寿命均有明显的影响，其中对羽化率($F = 56.207$，$df = 4$，$P < 10^{-4}$)、雌虫体重($F = 74.183$，$df = 4$，$P < 10^{-4}$)、雄虫体重($F = 156.302$，$df = 4$，$P < 10^{-4}$)、交配率($F = 3.721$，$df = 4$，$P = 0.0115$)、产仔量($F = 51.461$，$df = 4$，$P < 10^{-4}$)、雌虫寿命($F = 4.531$，$df = 4$，$P = 0.0241$)和雄虫寿命($F = 7.022$，$df = 4$，$P = 0.0022$)的影响程度均受到 Cu^{2+} 处理浓度的极显著影响。处理浓度越高，影响越明显。然而 Cu^{2+} 处理对成虫性比则无显著影响($F = 0.181$，$df = 4$，$P = 0.9435$)(表 3)。

当各处理子代幼虫不再经 Cu^{2+} 处理时，其羽化率($F = 0.181$，$df = 4$，$P = 0.9429$)、雌雄性比($F = 0.434$，$df = 4$，$P = 0.7815$)、雌虫体重($F = 0.741$，$df = 4$，$P = 0.5851$)、雄虫体重($F = 0.98$，$df = 4$，$P = 0.4606$)、交配率($F = 0.079$，$df = 4$，$P = 0.9879$)、产仔量($F = 1.837$，$df = 4$，$P = 0.1438$)、雌虫寿命($F = 1.019$，$df = 4$，$P = 0.4215$)，以及雄虫寿命($F = 0.954$，$df = 4$，$P = 0.4729$)与对照相比则同样均未受到显著的影响(表 3)。

2.2　棕尾别麻蝇各虫态体内的 Cu^{2+} 含量

幼虫经不同浓度 Cu^{2+} 处理后，亲代体内 Cu^{2+} 含量(42.231 ~ 325.691 μg/g) 明显高于对照(0.212 ~ 3.862 μg/g)，且其在变态过程中变化趋势十分明显(图 2：A)。在幼虫期，随着幼虫发育时间的推移(即 Cu^{2+} 处理时间的延续)，体内 Cu^{2+} 含量逐渐升高，至蛹前达到高峰，且这种趋势因 Cu^{2+} 处理浓度的升高而加剧。蛹期 Cu^{2+} 含量度陡然下降，这说明幼虫在化蛹前可能排出体内积累的部分 Cu^{2+}。羽化后，体内 Cu^{2+} 含量继续下降，并渐趋稳定。

当各处理 F_1 代幼虫不再经受 Cu^{2+} 处理时，Cu^{2+} 含量在 F_1 代变态过程中变化趋势类似于亲代，但其体内含量更低(图 2：B)。

表 3　不同浓度 Cu^{2+} 处理对棕尾别麻蝇亲代和子代成虫有关生物学特性的影响

Table 3　Effects of dietary copper at different concentrations on biological characteristics of *Boettcherisca peregrine* adults in the parental generation (P) and the first filial generation (F_1)

考察参数 Parameter	世代 Generation	Cu^{2+} 浓度 Cu^{2+} concentrations (μg/g)				对照 CK
		200	400	800	1 600	
羽化率 Eclosion ratio (%)	P	97.03 ± 2.62 a	98.02 ± 0.99 a	88.78 ± 4.02 b	64.69 ± 5.45 c	98.02 ± 0.99 a
	F_1	95.69 ± 2.07 a	96.35 ± 2.09 a	95.35 ± 3.8 a	96.03 ± 2.65 a	94.67 ± 2.08 a
性比 Sex ratio (♀ : ♂)	P	1.03 ± 0.08 a	0.99 ± 0.11 a	1.01 ± 0.05 a	1.05 ± 0.15 a	1.01 ± 0.06 a
	F_1	1.01 ± 0.06 a	0.98 ± 0.07 a	0.99 ± 0.07 a	1.03 ± 0.11 a	1.05 ± 0.09 a
交配率 Mating ratio (%)	P	66.67 ± 17.68 a	69.44 ± 16.67 a	41.67 ± 33.07 bc	33.33 ± 30.62 c	61.11 ± 22.05 ab
	F_1	62.20 ± 14.29 a	64.00 ± 12.94 a	65.40 ± 20.63 a	72.00 ± 18.15 a	67.00 ± 21.10 a
产仔量 Oviposition number (egg/♀)	P	84.10 ± 8.56 a	78.50 ± 10.28 b	48.50 ± 9.71 c	33.80 ± 5.63 d	74.20 ± 12.23 ab
	F_1	85.25 ± 8.99 ab	82.13 ± 7.62 ab	85.88 ± 8.79 ab	87.67 ± 7.08 a	76.38 ± 12.74 b
体重 Body weight (mg fw/larva)	P (♀)	33.25 ± 2.35 a	29.52 ± 2.56 b	15.51 ± 1.61 c	14.39 ± 0.18 c	29.13 ± 0.90 b
	P (♂)	31.59 ± 0.56 a	28.85 ± 2.11 b	15.17 ± 1.04 c	13.72 ± 0.73 c	28.47 ± 0.64 b
	F_1 (♀)	31.97 ± 2.63 a	32.51 ± 3.13 a	32.29 ± 1.07 a	30.93 ± 1.30 a	33.77 ± 1.2 a
	F_1 (♂)	30.27 ± 2.83 a	28.85 ± 2.11 a	30.35 ± 2.07 a	27.44 ± 1.47 a	29.07 ± 1.68 a
寿命 Longevity (d)	P (♀)	33.33 ± 3.21 a	32.67 ± 6.81 ab	24.67 ± 4.51 bc	22.00 ± 2.65 c	34.00 ± 4.36 a
	P (♂)	31.07 ± 4.32 a	29.84 ± 5.19 a	24.27 ± 2.75 ab	18.25 ± 4.03 b	30.76 ± 4.19 a
	F_1 (♀)	33.40 ± 2.51 a	32.20 ± 2.59 a	28.40 ± 5.13 a	29.40 ± 7.67 a	29.00 ± 4.42 a
	F_1 (♂)	26.90 ± 3.64 a	28.70 ± 2.65 a	27.40 ± 3.80 a	25.20 ± 2.75 a	23.20 ± 5.51 a

数据为平均值 ± 标准差，同一行中数据后标有不同字母表示差异显著（$P < 0.05$，Duncan **新复极差法检验**）。The values are mean ± *SD*. In the same row, there are no significant difference among the data with the same lowercase letter at $P = 0.05$ (Duncan 's multiple range test).

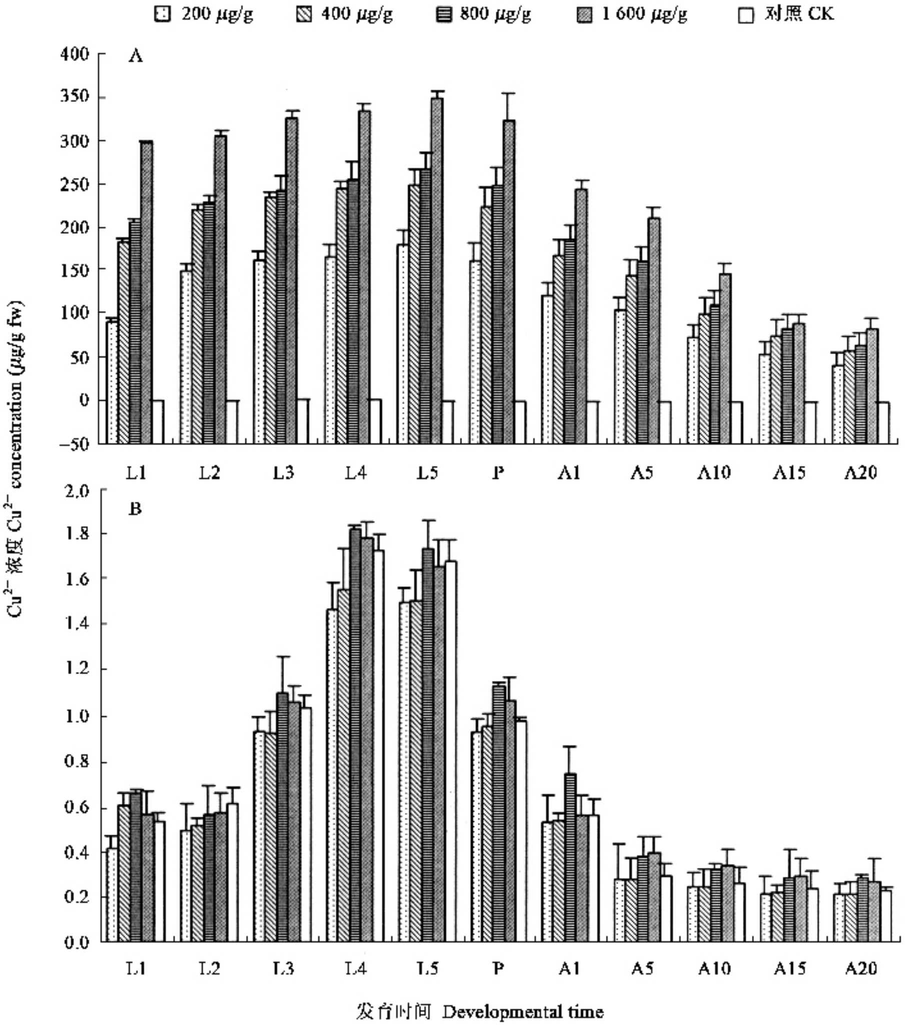

图 2　不同浓度 Cu^{2+} 处理后棕尾别麻蝇亲代（A）和子代（B）变态过程中体内 Cu^{2+} 浓度的变化

Fig. 2　Changes of Cu^{2+} concentration in *Boettcherisca peregrine* during its metamorphosis in the parental generation (A) and the first filial generation (B) after exposure to copper with different concentrations only in the parental generation

L1 ~ L5：**幼虫** Cu^{2+} **处理后的第** 1、2、3、4 **和** 5 **天** The larvae on the 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th day after exposure to Cu^{2+}；P：**蛹期** Pupal stage；A1 ~ A20：**成虫羽化后的第** 1、5、10、15 **和** 20 **天** The adults on the 1st, 5th, 10th, 15th and 20th day after eclosion.

3 讨论

本研究结果表明，棕尾别麻蝇幼虫饲喂含 Cu^{2+} 食物后，其亲代幼虫、蛹和成虫的大小与体重均受到了不同程度的影响；低浓度的 Cu^{2+}（如 200 μg/g）会促进棕尾别麻蝇的生长，高浓度能抑制昆虫生长。就高浓度铜抑制昆虫生长来说，对埃及伊蚊 *Aedes aegypti*（Rayms-Keller *et al*.，1998）、伸展摇蚊 *Chironomus tentans*（Nebeker *et al*.，1984；Gauss *et al*.，1985）和舞毒蛾 *L. dispar*（Gintenreiter *et al*.，1993b）已有报道。此外，Nascarella 等（2003）报道低浓度的金属镉（Cd）能提高伏蝇 *Phormia regina* 化蛹率，而较高浓度的 Cd 则抑制其化蛹。这些就是所谓的毒物兴奋效应（hormesis），即在低浓度刺激，高浓度抑制的剂量反应现象，是一个动态平衡被破坏后作为补偿机制发生的适应性剂量反应（Calabrese and Baldwin，2002）。

就较高浓度 Cu^{2+} 处理后导致棕尾别麻蝇亲代幼虫历期和蛹期明显延长的结果，与 Rayms-Keller 等（1998）的报道相似，即埃及伊蚊幼虫经 Cu^{2+} 处理后，成虫羽化延迟，具体羽化的时间由 Cu^{2+} 浓度调控。重金属处理后发育历期的延长在一定程度上可能是昆虫对重金属抑制其生长的一种补偿策略（Gintenreiter *et al*.，1993b；van Ooik *et al*.，2007）。较高浓度 Cu^{2+} 处理后则导致棕尾别麻蝇亲代成虫寿命明显缩短，这在有关 Cu 对舞毒蛾的研究中也有相关的报道（Gintenreiter *et al*.，1993b）。这与昆虫体内碳水化合物、脂类和蛋白质的代谢以及细胞的正常生理功能受到重金属严重影响有关（吴国星，2005）。

高浓度的 Cu^{2+} 处理能明显抑制棕尾别麻蝇亲代的交配和产仔能力，浓度越高抑制作用越显著。究其原因，可能是重金属处理后导致了昆虫生殖器官的非正常发育，或重金属通过卵孔进入到卵，进而抑制卵的孵化（Rayms-Keller *et al*.，1998），也有可能是重金属阻止了卵黄的生成（Cervera *et al*.，2005）。

本研究结果还表明，一旦产仔后，其子代在不再经受 Cu^{2+} 处理的前提下，其生存、生长发育和繁殖则不会受到显著的抑制作用。由各虫态体内 Cu^{2+} 含量的测定结果可以推断，其原因可能是在处理后 Cu^{2+} 仅能在亲代高浓度地累积，但随着化蛹和羽化过程已经被大量地排出体外，而没有通过产仔传递予子代。可见，Cu^{2+} 对棕尾别麻蝇亲代的影响不能传递至下一代。然而，Cd^{2+} 与 Hg^{2+} 对绿纹蝗 *Aiolopus thalassinus* 影响则正好与我们的研究结果相反，据 Schmidt 等（1992）报道，亲代绿纹蝗经 Cd^{2+} 处理后，如果子一代不再经受 Cd^{2+} 处理，其幼虫期仍会延长，成虫体重仍会减轻，寿命仍会缩短，产卵量和卵孵化率仍会降低。这可能与金属的种类及昆虫的种类有关，但还需我们进一步证实。

参考文献（References）

Bremner I，1998. Manifestations of copper excess. *Amer. J. Clin. Nutr.*，67（Suppl.）：1 069 – 1 073.

Calabrese EJ，Baldwin LA，2002. Defining hormesis. *Hum. Exp. Toxicol.*，21：91 – 98.

Cervera A，Maymó AC，Martínez-Pardo R，Garcerá MD，2005. Vitellogenesis inhibition in *Oncopeltus fasciatus* females（Heteroptera：Lygaeidae）exposed to cadmium. *J. Insect Physiol.*，51：895 – 911.

Crawford LA，Hodkinson ID，Lepp NW，1990. The effects of feeding by the black bean aphid *Aphis fabae* Scop.（Homoptera：Aphididae）on copper and cadmium accumulation in broad bean（*Vicia faba* L.）. *Environ. Geochem. Health*，12：245 – 251.

Crawford LA，Hodkinson ID，Lepp NW，1995. The effect of elevated host-plant copper and cadmium on the performance of the aphid *Aphis fabae*（Homoptera：Aphididae）. *J. Appl. Ecol.*，32：528 – 535.

Crawford LA，Lepp NW，Hodkinson ID，1996. Accumulation and egestion of dietary copper and cadmium by the grasshopper *Locusta migratoria* R and F（Orthoptera：Acrididae）. *Environ. Pollut.*，92：241 – 246.

Dallinger R，1994. Invertebrate organism as biological indicator of heavy metal pollution. *Appl. Biochem. Biotechnol.*，48：27 – 31.

Gauss JD，Woods PE，Winner RW，Skillings JH，1985. Acute toxicity of copper to three life stages of *Chironomus tentans* as affected by water hardness-alkalinity. *Environ. Pollut. Ser. A.*，37：149 – 157.

Gintenreiter S，Ortel J，Nop HJ，1993a. Bioaccumulation of cadmium，lead，copper and zinc in successive developmental stages of *Lymantria dispar* L.（Lymantriidae，Lepidoptera）：A life cycle study. *Arch. Environ. Contain. Toxicol.*，25：55 – 61.

Gintenreiter S，Ortel J，Nopp HJ，1993b. Effects of different dietary levels of cadmium，lead，copper and zinc on the vitality of the forest pest insect *Lymantria dispar* L.（Lymantriidae，Lepidoptera）. *Arch. Environ. Contain. Toxicol.*，25：62 – 66.

Lindqvist L，1992. Accumulation of cadmiun，copper，and zinc in five species of phytophagous insects. *Environ. Entomol.*，21（1）：160 – 163.

Nascarella MA，Stoffolano JGJr，Stanek EJ Ⅲ，Kosteckid PT，Calabresed EJ，2003. Hormesis and stage specific toxicity induced by cadmium in an insect model，the queen blowfly，*Phormia regina* Meig. *Environ. Pollut.*，124：257 – 262.

Nebeker AV，Cairns MA，Wise CM，1984. Relative sensitivity of *Chironomus tentans* life stages to copper. *Environ. Toxicol. Chem.*，3：151 – 158.

Niu CY，Jiang Y，Lei CL，Hu C，2002. Effects of cadmium on housefly：

influence on growth and development and metabolism during metamorphosis of housefly. *Entomol. Sin.*, 9:27 – 33.

Rayms-Keller A, Olson KE, McGaw M, Oray C, Carlson JO, Beaty BJ, 1998. Effect of heavy metals on *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) larvae. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 39:41 – 47.

Schmidt GH, Ibrahim NM, Abdallah MD, 1992. Long-term effects of heavy metals in food on developmental stages of *Aiolopus thalassinus* (Saltatoria: Acrididae). *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 23:375 – 382.

Tang QY, Feng MG, 2002. DPS© Data Processing System for Practical Statistics. Beijing: China Science Press. 33 – 59. [**唐启义, 冯明光, 2002. 实用统计分析及其 DPS 数据统计分析系统. 北京: 科学出版社. 33 – 59**]

van Ooik T, Rantala MJ, Saloniemi I, 2007. Diet-mediated effects of heavy metal pollution on growth and immune response in the geometrid moth *Epirrita autumnata*. *Environ. Pollut.*, 145:348 – 354.

Wang JF, Hu C, Chen YC, Min JX, Li JT, 2002. Effect of temperature over the body-length change of *Chrysomyia megacephala* (Fabrius). *Acta Parasitol. Med. Entomol. Sin.*, 9(2):100 – 105. [**王江峰, 胡萃, 陈玉川, 闵建雄, 李俊涛, 2002. 温度对大头金蝇 *Chrysomyia megacephala* (Fabricius) 幼虫体长变化的影响. 寄生虫与医学昆虫学报, 9(2):100 – 105**]

Wu GX, 2005. Responses of Flesh Fly (*Boettcherisca peregrine*) to Heavy Metals and Its Adaptation Mechanism. Hangzhou: PhD Dissertation, Zhejiang University. [**吴国星, 2005. 棕尾别麻蝇对重金属的反应及适应机制的研究. 杭州: 浙江大学博士学位论文**]

Wu GX, Ye GY, Hu C, Cheng JA, 2006. Cadmium effects on growth and development as well as reproduction of *Boettcherisca peregrine* in the parental generation and first filial generation. *Journal of Zhejiang University* (*Agric. Life Sci.*), 32(1):71 – 76. [**吴国星, 叶恭银, 胡萃, 程家安, 2006. 重金属镉对棕尾别麻蝇亲代及子代生长发育与繁殖的影响. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 32(1):71 – 76**]

(责任编辑: 黄玲巧)